

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS EM TERMINAIS DE CONTENTORES: CASO DE ESTUDO DO PORTO DE LEIXÕES

Evaluation of the Operational Conditions at Container Terminals: Application to the Port of Leixões, Portugal

MANUEL SILVA ⁽¹⁾, PAULO ROSA-SANTOS ⁽²⁾, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽³⁾ e HUGO LOPES ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, manueljddasilva@gmail.com

⁽²⁾ Professor Auxiliar Convidado, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, pjr Santos@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

⁽⁴⁾ Doutor Engenheiro, APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A.,
Avenida da Liberdade, 4451-851 Leça da Palmeira, hugo.lopes@apdl.pt

Resumo

Os problemas que levam à interrupção de operações em portos marítimos estão frequentemente relacionados com movimentos excessivos dos navios neles amarrados, provocados pelas ações do ambiente marinho. A redução desses movimentos é então determinante para aumentar a eficiência das operações de carga e descarga, para minimizar os custos das operações portuárias, bem como para reduzir os riscos de ameaças à segurança e ao ambiente.

Com recurso a uma nova ferramenta numérica da DHI, MIKE 21 MA (*Mooring Analysis*), foi feita uma avaliação preliminar do impacto da extensão do quebramar Norte de Leixões na resposta de navios amarrados nos terminais de contentores Norte (TCN) e Sul (TCS) do Porto de Leixões, e ainda o estudo da eficiência de diversos esquemas de amarração a serem aplicados num novo terminal de navios porta-contentores (NTC) atualmente em fase de planeamento.

Palavras-chave: Terminais de contentores, operações de carga e descarga, modelação numérica, análise da amarração.

Abstract

Stoppage of the (un)loading operations in container terminals is frequently related to the excessive motions of the moored ships caused by the marine environmental loads. Thus, the reduction of the ship's movements is important when aiming to increase port efficiency, minimizing operation costs and reducing the risk of accidents and damage to people, structures and to the environment.

A newly launched numerical model from DHI, MIKE 21 MA (*Mooring Analysis*), was used to study the impact of the extension of Leixões' Northern breakwater in the behavior of containerships moored at the North (TCN) and South (TCS) container terminals, as well as to evaluate the efficacy of several alternative mooring arrangements for a new container terminal (NTC) that is already being planned

Keywords: Container terminals, operational conditions, numerical modelling, mooring analysis.

1. Introdução

O tempo de inatividade e os problemas nas amarrações em portos expostos à agitação marítima estão, muitas vezes, relacionados com movimentos excessivos dos navios acostados. Por isso, a redução desses movimentos é importante para aumentar a eficiência das operações de carga e descarga, para minimizar os custos das operações portuárias e para reduzir os riscos ambientais e de segurança.

O aumento nas últimas décadas do transporte de carga contentorizada por mar, bem como as suas perspectivas de crescimento, impõem grandes desafios às autoridades portuárias, confrontadas simultaneamente com a evolução da frota de navios porta-contentores e com a maior exigência na redução dos tempos de ciclo (*turnaround times*).

Este trabalho analisa a resposta de navios amarrados nos vários terminais de contentores do Porto de Leixões, avaliando a amplitude dos seus movimentos e as forças aplicadas no seu sistema de amarração. Foi usado o modelo numérico MIKE21, em particular o modelo *Boussinesq Waves* e o recém-lançado módulo de *Mooring Analysis* (MIKE21, 2016 e 2017). O estudo pretende fazer uma avaliação preliminar do impacto da extensão do quebramar norte de Leixões na resposta de navios atracados nos terminais de contentores Norte (TCN) e Sul (TCS) para os esquemas de amarração habitualmente utilizados, bem como avaliar a eficácia de vários esquemas de amarração alternativos para um novo terminal de contentores (TCN) que se encontra em planeamento e que envolve uma reconfiguração significativa do atual layout do porto, Figura 1.

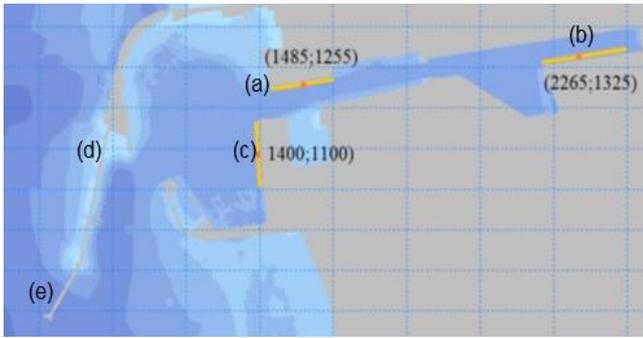


Figura 1. Porto de Leixões e localização dos terminais de contentores: (a) Terminal de Contentores Norte, (b) Terminal de Contentores Sul, (c) Novo Terminal de Contentores (em planeamento), (d) Quebramar Norte, (e) Extensão do Quebramar Norte (em planeamento).

O estudo numérico incluiu as seguintes três fases principais: (i) construção de modelos batimétricos para os diferentes cenários, (ii) propagação de ondas (agitação irregular) para o interior do porto utilizando o módulo MIKE 21 BW, e (iii) a simulação da resposta de navios amarrados nos terminais de contentores e posterior análise. Assim, os resultados obtidos foram comparados com os critérios operacionais da PIANC e os propostos por D'Hont para navios porta-contentores (PIANC, 2012), e foi realizada uma estimativa aproximada da produtividade de uma única operação de descarrega usando uma definição simplificada de produtividade.

Para melhor perceber os efeitos da reconfiguração do Porto de Leixões nos terminais atualmente existentes, foram feitas comparações diretas da amplitude dos movimentos do navio amarrado entre a configuração atual e a nova configuração, para dois terminais: Terminal de Contentores Norte (Caso TCN) e Terminal de Contentores Sul (TCS).

Para o novo terminal de contentores foram estabelecidos três casos que cobrem cenários bastante distintos relativamente ao equipamento a bordo dos navios, os quais resultam em diferentes níveis de rigidez do sistema de amarração. O Caso NTC A corresponde a um sistema de amarração “suave”, o Caso NTC B traduz um sistema de rigidez intermédio e o Caso NTC C simula um sistema de amarração “rígido”.

2. Pressupostos Teóricos

Os cabos de amarração são utilizados para manter o navio próximo à estrutura de acostagem do terminal portuário, com movimentos restringidos, garantindo condições seguras e adequadas à realização das operações de (des)carga. Como a imobilização total do navio é impossível na prática, procura-se encontrar a combinação ideal de um número limitado de cabos de amarração que garanta que a amplitude dos movimentos do navio amarrado não excede certos níveis considerados admissíveis do ponto de vista da segurança ou produtividade. Estes últimos são conhecidos como critérios operacionais e têm sido um importante assunto de estudo em gestão e engenharia portuária.

A resposta do navio amarrado resultará da combinação das características do navio (principalmente forma submersa e volume submerso) e layout da amarração, das características mecânicas dos cabos de amarração e do sistema de defensas e, finalmente, das características das ações externas (magnitude e periodicidade).

Quando, devido a uma ação externa, um navio amarrado se move no plano vertical, origina uma resistência crescente da massa de água que tentará restaurar o navio para a posição de equilíbrio. Para os movimentos horizontais ocorrerá uma situação comparável devido aos cabos de amarração e/ou à reação da defesa. Em ambas as situações, por causa da inércia do navio, iniciar-se-á um movimento oscilatório no qual a água, os cabos de amarração e as defensas atuam como amortecedores ou dissipadores de energia. Esse tipo de comportamento tem uma clara semelhança com o sistema massa-mola. Aplicando essa analogia, fica assim claro como os cabos de amarração afetam o comportamento do navio e, conseqüentemente, a sua resposta às ações do ambiente marítimo. O período fundamental de oscilação de um navio amarrado (genérico), para um modo de oscilação afetado pelas características dos cabos de amarração, é dado simplifadamente por,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M+A}{K_{ml}}} \quad [1]$$

em que K_{ml} representa a rigidez dos cabos de amarração que se opõem ao movimento do navio, T o período natural de oscilação e M e A são, respetivamente, a massa e a massa adicionada do navio associada ao movimento oscilatório em análise. Apesar das simplificações que levam à Eq. [1] é possível estabelecer que, genericamente, o período natural aumenta com a massa do navio e a massa adicionada, e diminui com a adição de cabos de amarração ou com o uso de cabos de amarração mais rígidos. Isto confere grande importância à definição do esquema de amarração, uma vez que ao influenciar o período fundamental de oscilação do navio, é possível minimizar os efeitos de forças externas suscetíveis de provocar ressonância pela modificação da razão de frequências.

No entanto, um sistema do tipo massa-mola é naturalmente insuficiente para descrever o problema do navio amarrado. Cummins (1962) abordou essa questão no domínio do tempo, dividindo o problema em duas componentes: uma responsável pelo efeito instantâneo e uma segunda pelo efeito de memória, usando a seguinte equação diferencial ordinária,

$$\sum_{k=1}^6 (M_{jk} + a_{jk}) \ddot{x}_k(t) + \int_0^t K_{jk}(t-\tau) \dot{x}_k(\tau) d\tau + C_{jk} \dot{x}_k(t) = F_j(t) \quad [2]$$

em que M_{jk} representa a matriz de inércia, a_{jk} a matriz da inércia adicionada, C_{jk} as forças de restituição hidrostática e K_{jk} as funções de resposta a impulso. F_j representa as forças exteriores, designadamente as forças aplicadas nos cabos de amarração e nas defensas, as forças do ambiente marinho (e.g., vento, ondas, correntes), as forças de amortecimento viscoso, as forças de deriva e amortecimento por atrito para cada grau de liberdade do navio (MIKE 21, 2017).

O aumento do tamanho dos navios porta-contentores coloca também novos problemas às operações portuárias. De acordo com a Eq. (1), navios maiores terão períodos fundamentais maiores. Isso significa que alguns dos movimentos do navio podem sofrer amplificação harmónica induzida pelas ondas de longo período, que são mais difíceis de dissipar dentro do porto (PIANC, 1995).

Além disso, essas ondas são propensas a suscitar fenômenos de ressonância portuária, o que faz com que a sua energia seja amplificada dentro das próprias bacias portuárias. Alguns fenômenos não lineares fazem ainda com que essas ondas de longo período se amplifiquem à medida que a profundidade de água diminui na sua propagação até à costa.

Os movimentos do navio amarrado no plano horizontal são os mais associados à amplificação harmônica devido a ondas de longo período. O movimento de avanço é especialmente impactante na eficiência das operações que se realizam nos terminais portuários. Como os pórticos de cais são incapazes de se mover ao longo do cais durante o carregamento de um contentor, é impossível “seguir” o movimento do navio para o posicionar corretamente. O mesmo não se verifica noutros movimentos do navio, dada a velocidade do *trolley* ao longo da lança e as capacidades de *listing*, *trimming* e *skaveing* do *spreader*.

3. Caracterização do Caso de Estudo

3.1. Introdução

A aplicação do modelo MIKE21 requereu a caracterização dos aspetos geométricos, batimétricos, hidrodinâmicos e mecânicos do problema. Para o efeito foram utilizados dados obtidos junto da autoridade portuária, dados provenientes de estudos anteriores sobre o Porto de Leixões e ainda dados recolhidos por meio de trabalho de campo nos terminais de contentores Norte e Sul. Foram considerados os seguintes itens:

- Condições de agitação marítima e regime de maré;
- Batimetria, geometria do porto, posicionamento de defensas e cabeços de amarração;
- Condições fronteira;
- Tráfego de navios porta-contentores;
- Sistema de amarração - modelos de defensas, *layouts* típicos de acostagem e materiais dos cabos de amarração.

3.2. Condições de agitação marítima ao largo

A caracterização das condições de agitação marítima ao largo de Leixões foi realizada com base nos registos de uma bóia oceânica instalada a poucos quilómetros do porto de Leixões. Os 20 anos de registos de ondas, com espaçamento no tempo de 3 horas, para condições de mar normais, compreendiam: alturas de onda significativas e períodos médios de onda associados, e direções médias para o período de pico. Esses registos foram cruzados com as informações da autoridade portuária, tendo sido possível compreender que a maioria dos problemas nos terminais têm origem em ondas do setor Oeste, embora não sejam as mais frequentes e energéticas.

Essa constatação pode ser explicada pelo posicionamento da entrada do porto, o que o torna vulnerável a ondas que se propagam em torno da cabeça do quebramar norte. Como as ondas que se propagam do setor Oeste modificam o seu rumo devido ao fenómeno da refração e localmente apresentam-se quase perpendicularmente ao quebramar norte, são capazes de penetrar na bacia portuária por difração.

Tendo em atenção que os critérios operacionais para navios porta-contentores amarrados, Jensen *et al.* (1990), ditam que a frequência de excedência das amplitudes de movimento limite deve ser inferior a 2%, a altura de onda significativa que é excedida apenas 2% do tempo foi estimada e usada na análise, correspondendo a cerca de 5 m. Embora seja sabido que a relação entre a altura da onda ao largo e a condição de mar que pode levar o navio a desenvolver movimentos de grande amplitude não seja usualmente biunívoca, a altura de onda significativa que caracteriza a tempestade é ainda assim um fator importante, estando associada à geração de energia na banda de frequências infragravíticas do espetro.

O espetro de energia usado na representação das condições de agitação marítima na fronteira de geração do modelo foi obtido pela aplicação de métodos de análise FFT a uma série temporal de elevação de superfície livre obtida a partir de um estudo em modelo físico do Porto de Leixões (Rosa-Santos *et al.*, 2010), Figura 2. Como os modelos numéricos utilizados no presente estudo não incluíram a geração e transformação das ondas na sua propagação desde o largo até à área costeira em estudo (no exterior do porto), essa abordagem permitiu considerar um espetro mais realista nas simulações realizadas.

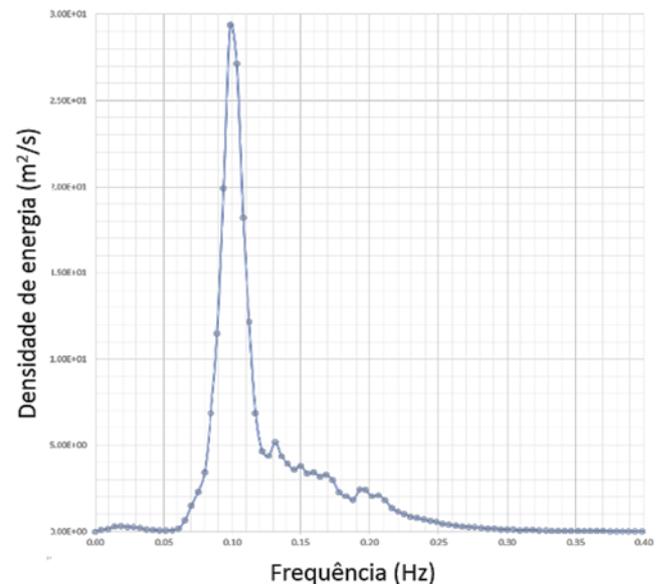


Figura 2. Espetro de densidade de energia utilizado na modelação numérica de propagação de ondas (altura de onda significativa, H_s , igual a 5 m e período de pico, T_p , igual a 10.2 s).

3.3. Esquemas de amarração típicos

Através da análise dos registos de tráfego de navios do tipo porta-contentores, bem como dos estudos de previsão de tráfego para o porto, foi escolhido um navio representativo para cada terminal (Quadro 1).

Quadro 1. Dimensões principais do navio representativo selecionado para cada terminal.

Terminal	Porte (t)	Calado (m)	Comprimento f.-a.-f. (m)	Boca (m)
TCN	11435	8.71	134.44	22.5
TCS	33742	11.4	207.4	29.87
NTC	-	13.7	300.0	40.2

Como a informação e os registos sobre os equipamentos de amarração dos navios e os locais de acostagem no Porto de Leixões era muito limitada, foi realizada uma campanha para recolha desses dados. Assim, para navios porta-contentores com classe e dimensões similares aos navios representativos, procedeu-se ao reconhecimento do material e à medição do diâmetro dos cabos de amarração, bem como à identificação do esquema de amarração utilizado.

Os cabos de amarração foram categorizados em 6 grupos de acordo com a sua orientação e posição no navio. Foi então possível definir esquemas de amarração representativos das condições de acostagem da maioria dos navios presentes, Figura 3 (Quadro 2) para posterior aplicação no modelo numérico. Comparativamente com os esquemas de amarração, verificou-se que as características dos cabos de amarração utilizados eram muito mais heterogéneas e não se conseguiram estabelecer tendências para cabos de amarração dentro de um mesmo grupo.

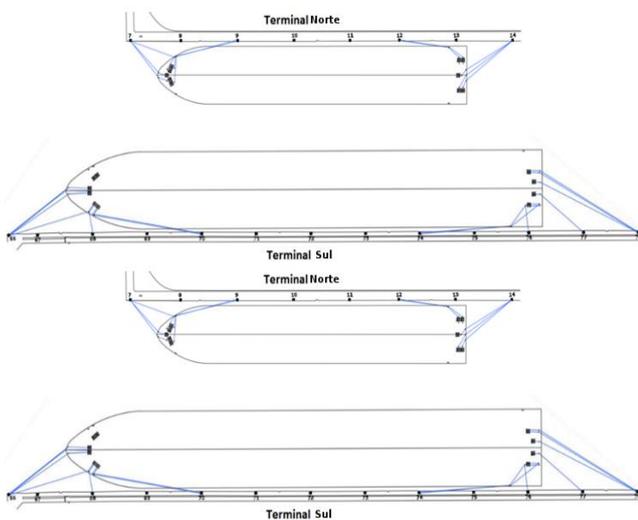


Figura 3. Esquemas de amarração típicos para os navios acostados no TCN (superior) e TCS (inferior).

Quadro 2. Caracterização dos esquemas de amarração típicos para os navios acostados no TCN e TCS em função do tipo, número, material e diâmetro dos cabos de amarração.

Cabo de amarração	Terminal Norte	Terminal Sul
Material	Polipropileno	Polipropileno
Diâmetro	60 mm	75 mm
Lançante-Proa	3	4
Través-Proa	-	1
Regeira-Proa	2	2
Regeira-Popa	2	2
Través-Popa	-	1
Lançante-Popa	3	4
Número Total	10	14

4. Estudo Numérico

4.1. Propagação de ondas

O modelo numérico MIKE21 BW foi usado para determinar a elevação da superfície livre da água e o campo de fluxo no interior da bacia portuária.

Este modelo numérico é baseado nas equações de *Boussinesq* expandidas (Madsen e Sørensen, 1992), sendo capaz de reproduzir a propagação de ondas em águas pouco profundas, incluindo interações onda-estrutura e também transformações de onda de segunda ordem. Foram desenvolvidas duas grelhas de 2500×2000 células, com 2×2 m² de dimensão, uma para o cenário atual e a outra para o cenário futuro, que considera a construção do novo terminal de contentores e a extensão do quebramar norte.

4.2. Análise da amarração

Após o estudo de propagação das ondas para o interior do porto, o modelo numérico MIKE 21 MA permitiu determinar os movimentos dos navios em todos os 6 graus de liberdade, assim como as forças no sistema de amarração. Este modelo numérico é constituído por duas ferramentas: módulo de cálculo da resposta no domínio da frequência (*Frequency Response Calculator*, FRC) e módulo de análise da amarração (*Mooring Analysis*, MA).

O módulo FRC é utilizado para resolver as equações integrais do escoamento potencial, a fim de obter o potencial para as ondas radiadas e difratadas. Assim, começa por considerar a geometria do navio e calcular os parâmetros hidrostáticos, sendo a superfície do casco representada através de painéis tridimensionais. Foram usadas duas malhas diferentes para modelar os três navios representativos, Quadro 1 e Figura 4.

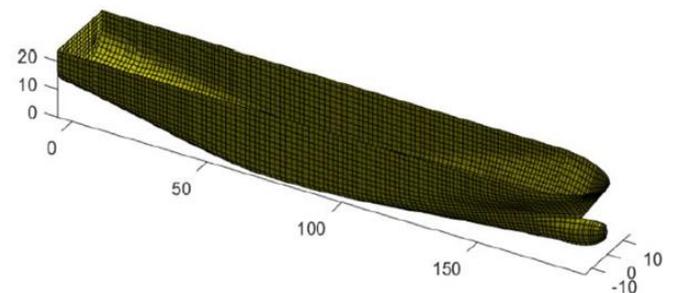


Figura 4. Grelha tridimensional do navio representativo do TCS.

O módulo FRC permite calcular os coeficientes de restituição hidrostática, o que resulta numa matriz 6×6 associada aos seis graus de liberdade do navio (*i.e.*, arfagem, guinada, cabeceio, deriva, avanço e balanço). Em seguida resolve o potencial de radiação, de forma a calcular o campo de fluxo que é devido às ondas difratadas e radiadas. Os dados que caracterizam a elevação da superfície livre são um dos *outputs* do modelo de propagação de ondas. Finalmente são obtidas as matrizes dos coeficientes hidrodinâmicos (massa adicionada e coeficientes de amortecimento), assim como as forças de deriva de segunda ordem, se consideradas na análise.

Usando uma equação similar à Eq. (2), o módulo MA resolve as equações de movimento do navio no domínio do tempo. Começa por obter uma matriz inercial para o navio livre (os cabos de amarração e defensas são interpretados como forças externas). Os coeficientes hidrodinâmicos (massa adicionada e amortecimento) são extraídos do módulo FRC, enquanto os resultados da simulação da propagação das ondas, obtidos com o módulo MIKE21 BW, são linearizados e considerados no cálculo pela aplicação das relações de Haskind (MIKE 21, 2017).

O módulo MA considera ainda os seguintes *inputs* adicionais: características de elasticidade dos cabos de amarração e das defensas (e eventualmente correntes); dados respeitantes ao navio, compreendendo o posicionamento dos guinchos e dos cabeços de amarração; dados portuários, que consistem no posicionamento cartesiano dos cabeços de amarração e das defensas; dados relativos à amarração do navio que incluem a definição da posição do navio no cais e dados dos cabos de amarração (curvas tensão-deformação, pré-tensionamento, guincho de origem, ponto de amarração em terra).

Em relação ao material dos cabos de amarração, os casos TCN e TCS foram definidos com base na caracterização do Quadro 2, que resultou na definição de cabos com uma força de rotura de 56.7 t e 70.8 t, respetivamente. A curva tensão-deformação desses cabos de amarração foi baseada nas recomendações da OCIMF (2008).

Nas simulações numéricas efetuadas para o novo terminal de contentores, foram usados três diferentes materiais, também definidos com base em OCIMF (2008), Figura 5. Pretendeu-se considerar diâmetros e cabos de amarração comercialmente disponíveis, com uma força de rotura semelhante, em torno de 105 t.

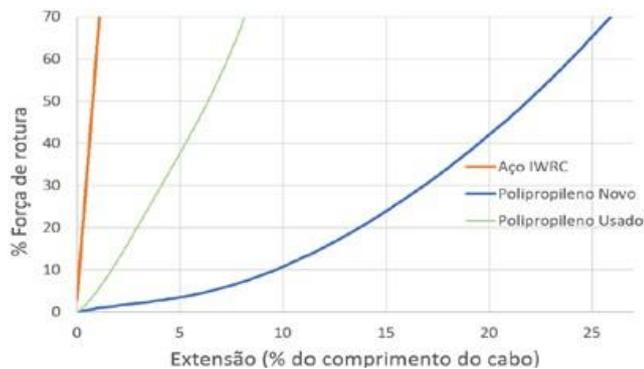


Figura 5. Curvas características dos cabos de amarração aplicados nos casos NTC1 (azul), NTC2 (verde) e NTC3 (laranja).

Para o caso NTC1, sistema de amarração de menor rigidez, foram definidos cabos de polipropileno novos. O caso NTC2, intermédio, foi baseado no mesmo material que o NTC1, mas com cabos de amarração já usados, que foram já submetidos a vários ciclos de (des)carga e, portanto, encontram-se mais rígidos. O NTC3 é o caso “rígido” e corresponde a usar como material o aço IWRC.

As características das defensas (Quadro 3) foram retiradas, diretamente, das suas curvas de desempenho, presentes em catálogos de fabricantes, à exceção dos coeficientes de atrito, que foram estimados. A estimativa baseou-se principalmente no material que entra em contato com o casco do navio e na extensão da área de contato.

Quadro 3. Características das defensas.

	TCN	TCS	NTC
Tipo de Defesa	Pneumática	Cone	Cone
Reação Máx. (kN)	837	1086	1247
Deformação Max. (m)	1.5	1	1.3
Deformação na Rotura (%)	64.5	74.8	74.8
Coefficiente de Atrito	0.500	0.091	0.092

As configurações finais de amarração para os casos TCN, TCS e NCT, que já incluem os guinchos, os cabeços de amarração e as defensas, bem como os perfis de materiais e *layouts* de amarração, são apresentados nas Figuras 6 e 7. Os esquemas de amarração utilizados no TCN e no TCS foram definidos de acordo com a caracterização apresentada na Figura 3.

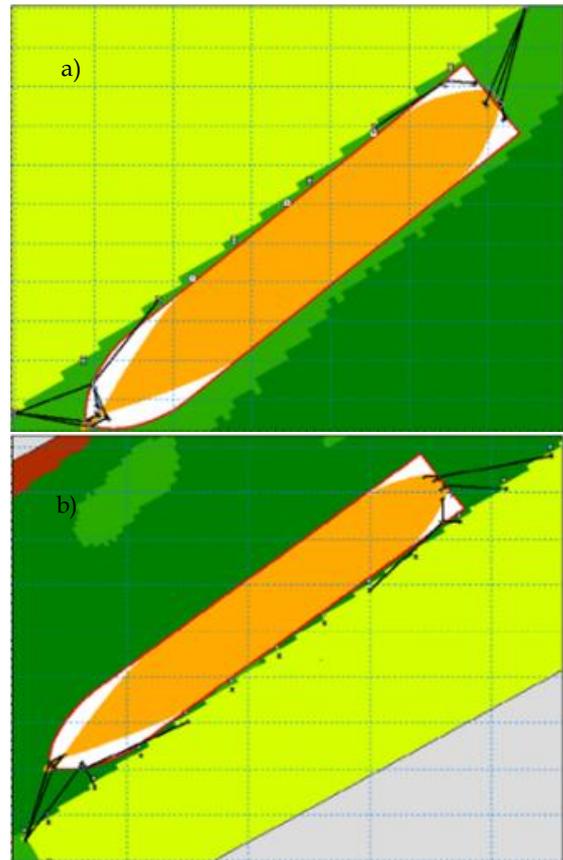


Figura 6. Setup do modelo MIKE 21 MA para o Caso TCS (a) e Caso TCN (b).

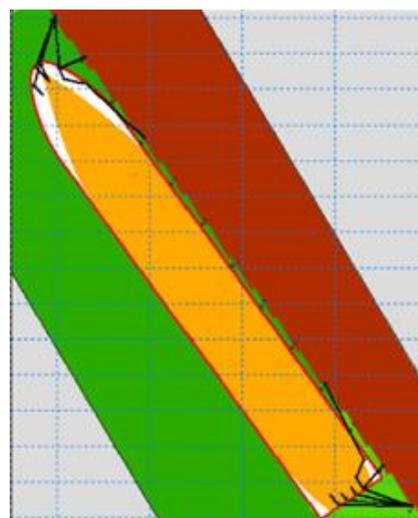


Figura 7. Setup do modelo MIKE 21 MA para o Caso NTC.

Como o NTC ainda não se encontra em operação, não pode ser determinado um esquema de amarração típico. Em vez disso, o esquema de amarração foi definido de acordo com as diretrizes da PIANC (1995) para um navio de porte bruto superior a 40.000 t. De acordo com essas diretrizes, deve ser um *layout* simétrico, com 16 cabos de amarração: 4 lançantes de proa, 4 regeiras, 4 traveseis e 4 lançantes de popa, Figura 7.

5. Resultados

A aplicação do módulo MIKE 21 MA permitiu obter as séries temporais relativas à amplitude dos movimentos do navio, assim como as forças aplicadas no seu sistema de amarração. Os espectros de densidade de energia foram determinados aplicando uma análise FFT às séries temporais.

Foi possível verificar que o navio responde em diversas frequências sendo o espectro obtido nessa análise usado para obter amplitudes de movimento significativas (usadas na análise dos critérios operacionais). As amplitudes máximas e significativas para, 100 e 95% de eficiência de carregamento, foram comparadas com os critérios propostos por D'Hont e por PIANC (PIANC, 2012), respetivamente (Quadro 4).

Quadro 4. Limites operacionais para navios porta-contentores.

	Avanço (m)	Deriva (m)	Arfagem (m)	Balanço (°)	Cabeceio (°)	Guinada (°)
PIANC, 1995	0.2/0.4	0.40	0.30	1.00	0.30	0.30
D'Hont, 1999	0.24	0.22	0.20	0.24	0.40	0.10

Assim, para o TCN e TCS, a eficiência de um processo de descarga foi avaliada com um critério baseado no encaixe das baionetas do *spreader* no *corner-casting*.

Para os 3 casos associados ao NTC foi feita uma análise adicional, de modo a avaliar o efeito do aumento do pré-tensionamento dos cabos de amarração na redução das amplitudes dos movimentos.

5.1. Terminal de contentores norte

No caso TCN verificou-se que, para as condições analisadas, as intervenções de reconfiguração do porto, resultariam na redução geral dos movimentos do navio amarrado, Figura 8. Tal é verificado, tanto nas amplitudes máximas, quanto para as amplitudes significativas de cada um dos movimento do navio. Por outro lado, para a situação atual, os movimentos de balanço e guinada não cumprem os critérios operacionais considerados. Para o novo cenário (reconfiguração do porto), apenas o movimento de guinada se mantém fora dos limites de D'Hont.

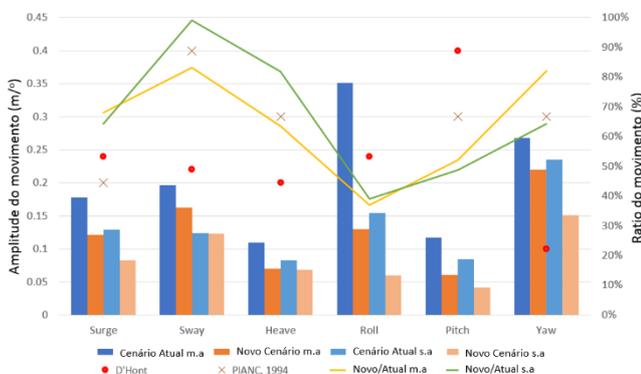


Figura 8. Amplitude máxima (m.a) e amplitude significativa (s.a) dos movimentos do navio amarrado no TCN. Comparação com critérios operacionais. Rácio entre a amplitude dos movimentos em ambos os cenários (atual e futuro).

Uma vez que, no que concerne à resposta do navio à ação das ondas, o avanço é considerado o movimento mais crítico de um navio porta-contentores amarrado (PIANC, 2012), foi realizada a análise da eficiência das operações considerando apenas este movimento e aplicando um critério baseado num limite de amplitude e velocidade do movimento de avanço, que, quando excedidos, não possibilitam a colocação do contentor, Figura 9.

Ambos os critérios tiveram como base a folga de encaixe das baionetas nos *corner-castings*, sem o auxílio das guias do *spreader* (o que resulta num critério mais rigoroso), conforme definido em PIANC (2012).

A eficiência foi definida como a percentagem do tempo total de operação em que a colocação do contentor podia ocorrer (Quadro 5). Para o novo cenário foi verificada uma melhoria de 8% na eficiência das operações para as condições de ondas simuladas, o que equivale, na prática, e para este terminal, à obtenção de uma situação de máxima produtividade.

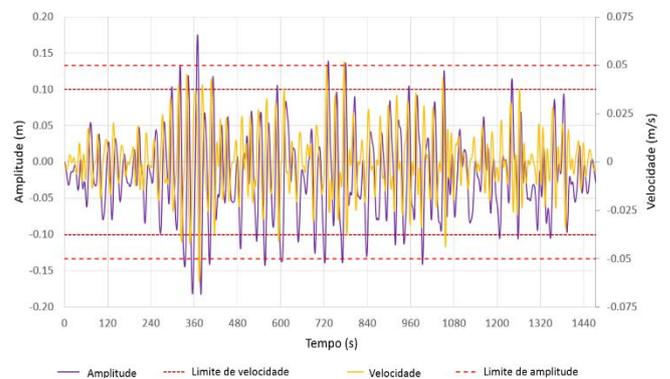


Figura 9. Série temporal da amplitude e velocidade do movimento de avanço para o Caso TCN. As linhas a tracejado representam os limites operacionais.

Quadro 5. Eficiência das operações no Terminal Norte, para o cenário atual e futuro.

	Tempo Total (s)	Tempo de Paragem (s)	Eficiência (%)
Cenário Atual	1474	145	90
Cenário Futuro	1474	28	98

5.2. Terminal de contentores sul

No caso do TCS verificou-se, também, que para as condições analisadas, o cenário de reconfiguração do porto resultaria numa redução dos movimentos do navio, Figura 10, afetando principalmente os movimentos do navio no plano horizontal, que reduzem para 50%, ou menos, da amplitude relativa ao cenário atual. Isso é verificado para amplitudes máximas e amplitudes significativas para cada movimento. Além disso, a redução dos movimentos do navio amarrado, com exceção do de arfagem, verificou-se ser mais do que proporcional à redução da energia das ondas junto ao terminal. Isto poderá estar relacionado com uma mudança nos períodos naturais (*i.e.*, de ressonância) da bacia semi-fechada que contém o terminal e uma deflexão favorável das ondas promovida pela orientação proposta para a extensão do quebramar norte.

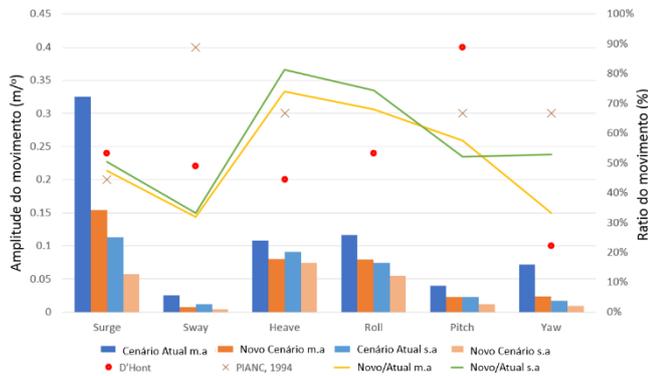


Figura 10. Amplitude máxima (m.a) e amplitude significativa (s.a) dos movimentos do navio no TCS. Comparação com os critérios operacionais. Rácio entre a amplitude dos movimentos em ambos os cenários (atual e futuro).

Resultados semelhantes foram observados no caso do TCN, mas em menor grau. Além disso, com o novo cenário, e de acordo com os critérios de movimento considerados, seria possível operar com eficiência máxima sob as condições de onda simuladas.

De acordo com os resultados obtidos neste estudo, é esperado um aumento significativo da eficiência no TCS, Quadro 6. Este resultado está em conformidade com o cumprimento dos critérios de D'Hont e da PIANC.

Quadro 6. Eficiência de operações no Terminal Sul, para o cenário atual e futuro.

	Tempo Total (s)	Tempo de Paragem (s)	Eficiência (%)
Cenário Atual	1474	252	83
Cenário Futuro	1474	22	99

5.3. Novo Terminal de Contentores - caso 1

Nos casos relacionados com o Novo Terminal de Contentores o objetivo passava por determinar a *layout* de amarração com o melhor desempenho, para três sistemas de amarração com características de rigidez distintas. O ponto de partida foi um esquema 4-2-2-2-2-4 (lançante de proa; través de proa; regeira de proa; regeira de popa; través de popa; lançante de popa), baseado nas recomendações da PIANC. Considerou-se que um melhor desempenho seria atingido se, comparativamente ao *layout* proposto em PIANC, se verificasse uma redução do movimento do avanço, desde que os outros movimentos não fossem significativamente agravados ou permanecessem compatíveis com os critérios operacionais estabelecidos, e as forças nos cabos de amarrações e defensas não excedessem os limites impostos pela OCIMF e as diretrizes dos fabricantes, respetivamente. Além disso, para os casos do NTC1 e NTC2, foi analisado como o comportamento do navio poderia ser melhorado através do aumento do pré-tensionamento nos cabos de amarração.

No caso do NTC1, para cabos de amarração de baixa rigidez, demonstra-se que o esquema de amarração com um melhor desempenho é um 5-1-2-2-1-5 simétrico, para o qual uma redução de 10% do movimento de avanço foi obtida, apesar do ligeiro aumento de movimentos de deriva e de balanço e um aumento mais significativo do movimento de guinada.

Relativamente ao uso de pré-tensão nos cabos de amarração, constata-se que foi possível reduzir, significativamente, os movimentos de avanço e guinada do navio, mantendo, tanto a força de reação nas defensas quanto as forças aplicadas nos cabos de amarração, abaixo dos limites de segurança (Figura 11). Os efeitos na deriva também são positivos, mas não tão significativos, e não houve efeitos perceptíveis no cabeceio e na arfagem, tal como esperado. O movimento de balanço do navio agrava até 140% do valor inicial para 10 t de pré-tensão, embora tal não fosse esperado, uma vez que o aumento da pré-tensão, habitualmente, favorece a dissipação de energia por fricção na linha de defensas.

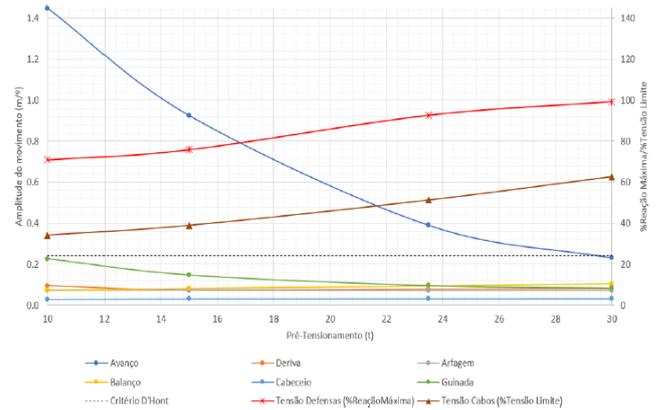


Figura 11. Evolução da amplitude dos movimentos do navio, reação nas defensas e tensão nos cabos de amarração, com o aumento do pré-tensionamento inicial para o caso NTC1.

5.4. Novo Terminal de Contentores - caso 2

No caso do NTC2, o esquema de amarração com o melhor desempenho consistiu num 4-1-3-3-1-4 simétrico. Com esse *layout*, o movimento de avanço é reduzido em 11% e também há uma redução de 4% no movimento de deriva. Por outro lado, e tal como era esperado devido à redução do número de travesses, a amplitude do movimento de guinada aumenta significativamente. Os restantes movimentos do navio não sofreram alterações notáveis.

Relativamente à influência do pré-tensionamento dos cabos de amarração, Figura 12, os resultados foram idênticos aos obtidos para o NTC1: redução significativa nos movimentos de avanço e de guinada (embora neste caso o movimento de guinada seja mais afetado), efeitos pouco notórios na deriva, arfagem e cabeceio, e efeitos negativos no movimento de balanço.

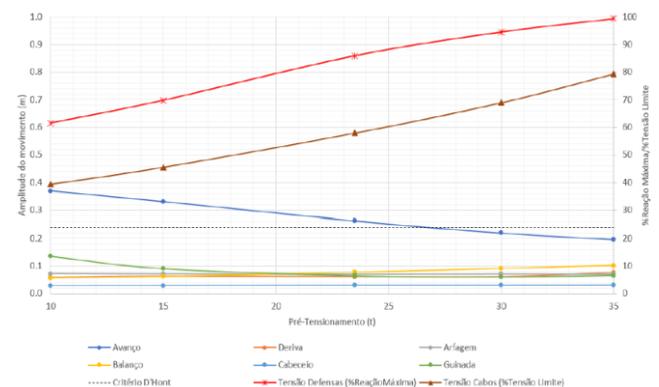


Figura 12. Evolução da amplitude dos movimentos do navio, reação nas defensas e tensão nos cabos de amarração, com o aumento do pré-tensionamento inicial para o Caso NTC2.

5.5. Novo Terminal de Contentores – caso 3

Para os cabos de amarração rígidos (NTC3), o esquema de amarração proposto por PIANC (1995) aparenta ter o melhor desempenho global, cumprindo simultaneamente os critérios operacionais da PIANC e de D'Hont.

6. Conclusões

Os resultados e conclusões obtidos neste estudo preliminar mostram que a construção da extensão do quebramar norte do Porto de Leixões terá um impacto positivo na eficiência das operações nos terminais atualmente existentes e reduzirá os períodos de paragem das operações durante o ano.

Relativamente ao Novo Terminal de Contentores, a definição de um layout de amarração típico deverá ter em consideração as características dos cabos de amarração que equipam os navios. Se os cabos de amarração constituírem um sistema de baixa rigidez, os resultados obtidos neste estudo sugerem o uso de um *layout* 5-1-2-2-1-5 (lançante de proa; través de proa; regeira de proa; regeira de popa; través de popa; lançante de popa), mobilizando, portanto, uma resistência ao movimento adicional, paralela ao cais, mas mantendo uma resistência suficiente na perpendicular ao cais, para aproveitar os efeitos do atrito nas defensas.

Se o sistema for considerado como tendo rigidez intermédia, é sugerido um esquema de amarração 4-1-3-3-1-4 com o uso de 6 regeiras, para promover uma redução do movimento de avanço. Para um sistema rígido, o *layout* de amarração 4-2-2-2-2-4 foi considerado como sendo o mais equilibrado, tendo proporcionado movimentos gerais reduzidos.

No entanto, deve ser referido que os resultados e conclusões apresentados derivam de um número bastante limitado de simulações, especialmente no que diz respeito às condições de agitação simuladas no modelo de propagação de ondas, já que apenas uma direção de geração foi considerada, e à gama de navios utilizados na análise dos esquemas de amarração. Como tal, os resultados obtidos são meramente indicativos. A abordagem utilizada neste trabalho poderá, contudo, ser estendida para produzir resultados mais representativos da realidade e, eventualmente, para uma aplicação no projeto do novo terminal para navios porta-contentores de Leixões.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à DHI e DHI Portugal pelo suporte técnico e pela disponibilização das licenças do modelo MIKE 21, essenciais à realização do presente trabalho.

Referências

- Cummins, W. E., 1962. *The impulse response function and ship motions*. Schiffstechnik, 9:47, pp.101-109.
- D'Hont, E., 1999. *Port and terminal construction design rules and practical experience*. Proc. of 12th International Harbour Congress, Antwerp.
- Jensen, O. J.; Viggósson, G.; Thomsen, J.; Bjørdal, S.; Lundgren, J., 1990. *Criteria for Ship Movements in Harbours*. Proc. of the International Conference on Coastal Engineering, Venice, Italy.
- Madsen, P. A., Sørensen, O. R., 1992. *A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics*. Part 2. A slowly-varying bathymetry, Coastal Engineering, 18:3-4, 183-204, ISSN 0378-3839, doi:10.1016/0378-3839(92)90019-Q.
- MIKE21, 2016. BW – *Boussinesq Wave Model*, User manual, 2016, DHI.
- MIKE21, 2017. MA – *Mooring Analysis Module*, User manual, 2017, DHI.
- OCIMF, 2008. *Mooring Equipment Guidelines*. Oil Companies International Maritime Forum (OCIMF), Witherby Seamanship International, 3rd Edition, Livingston, United Kingdom, 278p. ISBN:978-1-905331-21-1
- PIANC, 1995. *Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours - A Practical Guide*. Report of the WG 24 of the Permanent Technical Committee II, Supplement to Bulletin N°88. PIANC, International Navigation Association. ISBN: 2-87223-070-X.
- PIANC, 2012. *Criteria for the (un)loading of container vessels*. Report n°115. PIANC, Maritime Navigation Commission. ISBN: 978-2- 87223-195-9.
- Rosa-Santos, P.J., 2010. *Análise da Interação de Navios com Dispositivos de Acostagem e Amarração. Estudo em Modelo Físico do Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões*. Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Vol. I.